

Síntesis Ejecutiva



# Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano

Una Mirada desde la Minería

Autores: Patricio Meller y Bárbara Salinas



Serie de Estudios sobre Minería, Tecnología y Sociedad



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



# Beauchef Minería

Es una iniciativa de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Su misión es ser un centro de pensamiento que cumpla funciones orientadoras y de apoyo a las políticas públicas en el ámbito minero. De esta forma, busca contribuir al aumento de la competitividad de la industria minera nacional, cooperar al fortalecimiento y articulación de su ecosistema de innovación y posicionar las actividades de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en el ámbito nacional e internacional.

Como parte importante de su quehacer, Beauchef Minería organiza coloquios y estudios sobre temas de alto interés para la industria minera, los que dan cuenta de las actividades de I+D+i en minería de la Facultad.

---

## "Síntesis ejecutiva"

Estudio completo se encuentra disponible en:  
[www.beauchefmineria.cl](http://www.beauchefmineria.cl)

## Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano

Una Mirada desde la Minería

### Serie de Estudios sobre Minería, Tecnología y Sociedad

#### Miembros del Directorio:

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| Javier Ruiz del Solar | Patricio Meller  |
| James McPhee          | Alejandro Jofré  |
| Willy Kracht          | Fernando Ordóñez |

#### Comité Editorial:

Patricio Meller  
Gabriela Novoa  
Javier Ruiz del Solar  
Bárbara Salinas

#### Colaboradores:

|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Rodrigo Cortés  | Alejandro Ehrenfeld |
| Luis Vargas     | Paul Vallejos       |
| Alejandro Jofré |                     |
| Álvaro Egaña    |                     |

[contacto@beauchefmineria.cl](mailto:contacto@beauchefmineria.cl)

<http://www.beauchefmineria.cl/>

Av. Beauchef 850, Santiago, Chile

#### Diseño e Impresión:

<http://www.publisiga.cl/>

Marzo de 2019



# Contenido



|                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Prólogo</b>                                                                                                                            | <b>4</b>  |
| <b>Introducción</b>                                                                                                                       | <b>6</b>  |
| <b>I. El Capital Humano Avanzado y la Revolución Tecnológica 4.0</b>                                                                      | <b>8</b>  |
| - El capital humano es fundamental para el desarrollo de los países.                                                                      | 9         |
| - Chile no puede dejar pasar la revolución tecnológica 4.0.                                                                               | 11        |
| - Una nueva forma de generar innovación: modelo dual.                                                                                     | 12        |
| - La tecnología avanza tan rápido que provoca problemas de adaptación.                                                                    | 15        |
| <b>II. Capital Humano en Chile</b>                                                                                                        | <b>16</b> |
| - En Chile hay escasez de doctores en sectores tecnológicos relevantes.                                                                   | 20        |
| - En Chile la I&D no es valorada.                                                                                                         | 22        |
| - El Interesante rol de los doctores en países desarrollados.                                                                             | 24        |
| - ¿Qué hacen los doctores en Chile?                                                                                                       | 25        |
| - La distribución de Becas Chile es inconsistente con las necesidades que tiene el país para insertarse en la Revolución Tecnológica 4.0. | 26        |
| - La minería chilena posee una fuerza laboral poco especializada.                                                                         | 28        |
| - ¿Por qué las empresas chilenas deberían contratar más doctores?                                                                         | 29        |
| <b>III. Tendencias Tecnológicas Relevantes para la Minería Futura</b>                                                                     | <b>30</b> |
| - <b>Enfoque 1:</b> Tendencias globales determinantes para el futuro de la minería.                                                       | 31        |
| - <b>Enfoque 2:</b> Programas colaborativos.                                                                                              | 35        |
| - <b>Enfoque 3:</b> Tendencias tecnológicas específicas de los procesos productivos.                                                      | 37        |
| - ¿Qué tipo de capital humano necesitaremos para la minería del futuro?                                                                   | 38        |
| <b>Referencias</b>                                                                                                                        | <b>44</b> |





# Prólogo

**La Revolución Tecnológica 4.0**, impulsada por la transformación digital, la automatización, la robótica, el IoT (Internet de las cosas), el *Big Data* y la inteligencia artificial, está impactando a todas las industrias a nivel mundial. Por una parte se espera que, al igual que revoluciones anteriores, esta permita mejorar nuestra calidad de vida. Pero por otra, existe preocupación por los acelerados cambios que se producirán y la posibilidad de que se generen grandes impactos negativos, como mayores cifras de desempleo o el incremento de la desigualdad entre los países y las industrias que sean capaces de aprovechar y capitalizar estas tecnologías y aquellos que no. Sin duda, existe preocupación en el mundo entero sobre cómo surfear esta mega ola tecnológica.

No cabe duda de que el capital humano es un elemento clave para enfrentar adecuadamente este proceso y, ciertamente, aquellos países e industrias que cuenten con profesionales entrenados en las nuevas tecnologías, podrán adaptarse de mejor forma al tsunami tecnológico que nos está inundando.



En este contexto, el presente estudio es de crucial importancia al identificar aspectos claves que deben ser abordados por Chile y su industria minera para ser parte de esta nueva era tecnológica.

“Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano: Una Mirada desde la Minería” aborda -de una manera clara y precisa- la brecha con los países desarrollados asociada al capital humano requerido para las múltiples innovaciones tecnológicas que están ocurriendo en el siglo XXI, presentando las falencias de Chile en esta materia. Asimismo, ofrece un acertado análisis sobre las tendencias tecnológicas relevantes para la minería futura, identificando desafíos de corto, mediano y largo plazo en el ámbito del capital humano.

Desde Beauchef Minería esperamos que este estudio sea un aporte a la discusión de estas materias en nuestro país, teniendo como principal objetivo, aportar al aumento de la competitividad de la industria minera nacional, cooperar con el fortalecimiento y articulación de su ecosistema de innovación y con planteamientos de temas estratégicos para el desarrollo del sector.

**Javier Ruiz del Solar**

**Director Ejecutivo Beauchef Minería**

# Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano

## Una Mirada desde la Minería<sup>1</sup>

Autores: Patricio Meller & Bárbara Salinas

# Introducción



6

A pesar de que Chile ha mejorado sus índices económicos y la calidad de vida de sus ciudadanos, aún existe una gran brecha con los países desarrollados asociada al capital humano requerido para las múltiples innovaciones tecnológicas que están ocurriendo en el siglo XXI. Esta es la problemática que motivó el desarrollo de este estudio y que ha generado una serie de preguntas que trataremos de abordar; sin embargo hay que tener presente que a veces las interrogantes son más relevantes que las respuestas.

Así surge la principal pregunta de este estudio, que es determinar cuál es el capital humano que aumentaría la probabilidad de que Chile se inserte en la Revolución Tecnológica 4.0.

La forma de enfrentar el tópico del capital humano ha ido variando a medida que Chile avanza en términos económicos. Hace cien años nos preguntábamos cuándo Chile iba a ser un país desarrollado. Hoy en día el cuestionamiento está más relacionado con el método que usaremos para llegar a esta meta. Dada las características de nuestra economía, surge el planteamiento sobre si el cobre puede transformar a Chile en un país desarrollado. ¿Por qué el cobre? La respuesta es que Chile es chico en todo, menos en cobre. Si nos comparamos con China, un país que nos supera en prácticamente todos los índices económicos, en cobre es muy inferior a nosotros.

Otro concepto importante dentro de este estudio es que estamos viviendo una revolución tecnológica 4.0 basada en la transformación digital, la robótica, la nanotecnología, la bio-genética y combinaciones entre estas cuatro tecnologías. Chile vio pasar las tres revoluciones tecnológicas anteriores: el motor a vapor en el siglo XVIII, la electricidad y petróleo en el siglo XIX y el computador del siglo XX. Esta nueva revolución la tenemos delante de nosotros y no podemos dejarla pasar. Pero ¿cómo se inserta Chile en la Revolución Tecnológica 4.0?

Existe una hipótesis que plantea que el mundo es plano, que la información y el conocimiento están disponibles en todas partes (Friedman 2005). Casi todos tienen celulares, cada celular

tiene más capacidad de lo que tenía un computador cuando el ser humano llegó a la luna. En teoría, con este potencial tecnológico cualquiera podría inventar cualquier cosa en cualquier lugar. Sin embargo, si bien la información, el conocimiento y la tecnología están disponibles en todos lados, ¿por qué Chile no está en la frontera de la innovación?

Así surge la principal pregunta de este estudio, que es determinar cuál es el capital humano que aumentaría la probabilidad de que Chile se inserte en la Revolución Tecnológica 4.0. Para esto hemos propuesto dos supuestos claves: (1) necesitamos mayor número de doctores en ciencias y tecnología y (2) el cobre nos servirá como plataforma de innovación tecnológica.

Este estudio intenta responder a las interrogantes previamente mencionadas con el objetivo de poner este tema en la agenda y hacer un análisis que sea útil para el sector público, universidades, centros de investigación y empresas mineras.

<sup>1</sup> Este estudio forma parte de las actividades desarrolladas por Beauchef Minería durante el año 2018. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias recibidas de Javier Ruiz del Solar, Rodrigo Cortés, James McPhee, Alejandro Jofré, Luis Vargas, Álvaro Egaña, Alejandro Ehrenfeld y Paul Vallejos. Como es habitual, los autores son los únicos responsables por el contenido.





# I. El Capital Humano Avanzado y la Revolución Tecnológica 4.0





La revolución tecnológica, el incremento exponencial de la información y de la digitalización, hacen que el capital humano sea esencial para la incorporación de nuevas tecnologías.



### El capital humano es fundamental para el desarrollo de los países

El capital humano (KH) representa la educación, habilidades y aptitudes que posee un individuo. En teoría, las personas que quieran aumentar sus ingresos deberían destinar tiempo y recursos para aumentar su capacidad productiva; esto explica que la gente invierta tanto en estudios superiores. Por lo que la educación se ha transformado en el principal mecanismo para abordar los problemas de desigualdad y movilidad social.

Pero la educación formal no es el único mecanismo para la adquisición de KH. La experiencia en el lugar de trabajo, la interacción con otras personas, el entorno cultural y familiar y el conocimiento tácito adquirido aumentan el KH.

En la actualidad, el KH dejó de ser considerado solo como una solución individual para aumentar el nivel de ingresos y pasa a ser un factor clave para la competitividad y el éxito económico y social de los países. La revolución tecnológica, el incremento exponencial de la información y de la digitalización, hacen que el capital humano sea esencial para la incorporación de nuevas tecnologías.

Las universidades adquieren la responsabilidad de generar la oferta y tipo de KH que requieren las empresas. Además, debieran relacionarse más con el sector productivo para familiarizarse con sus problemáticas. Esto requiere una mayor interacción entre los ejecutivos de las empresas y los académicos, lo cual crea un círculo virtuoso para ambos. Diversos estudios han demostrado que la colaboración entre las universidades y el sector privado es clave para que los doctores puedan posteriormente encontrar trabajo en empresas<sup>2</sup>. Razón por la cual muchos países desarrollados han implementado políticas públicas que incentiven estas alianzas colaborativas<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Durette et al. 2012; Etzkowitz (2003); Benito, M. & Romera (2013)

<sup>3</sup> Borrel Damian et al. (2015)



# ¿Están los líderes políticos, la academia y los CEO de las empresas preparados para aprovechar el potencial vinculado a la Revolución 4.0?



## Chile no puede dejar pasar la Revolución Tecnológica 4.0

Las Revoluciones Industriales han sido las responsables de los aumentos en las tasas de crecimiento económico y el estándar de vida en el mundo. Actualmente, estamos viviendo la *Cuarta Revolución Industrial*, caracterizada por avances en biotecnología, robótica, nanotecnología, inteligencia artificial, etc. Lo que la diferencia de las anteriores es la velocidad con la que ocurren los cambios; su amplia cobertura y profundidad; y su impacto sistémico, lo cual implica que está modificando el mundo, al punto en que “está cuestionando las ideas que tenemos respecto a qué significa ser un ser humano” (Schwab 2016).

¿Están los líderes políticos, la academia y los CEO<sup>4</sup> de las empresas, preparados para aprovechar el potencial vinculado a la Revolución 4.0?

Las empresas productivas tendrán que impulsar cambios organizacionales profundos; los CEO tienen que comprender las nuevas tecnologías para insertarlas en sus operaciones y procesos. Según Deloitte (2017), muy pocos ejecutivos tienen claridad para invertir en tecnologías modernas, pues esto implica salir de su zona de confort por cuanto hay que adoptar nuevos modelos de negocios y enfrentar desafíos con impredecibles consecuencias.

<sup>4</sup> CEO: Chief Executive Officer





En países desarrollados se reconoce la importancia que tiene el KH especializado para la innovación. Por esto, se han impulsado diversas iniciativas que buscan incrementar la participación del KH especializado en el sector productivo. Sin embargo, en Latinoamérica las empresas invierten poco en I&D (Investigación y Desarrollo), lo que se explica en parte por la falta de capacidad<sup>5</sup> tecnológica (capacidad + habilidad) que poseen.

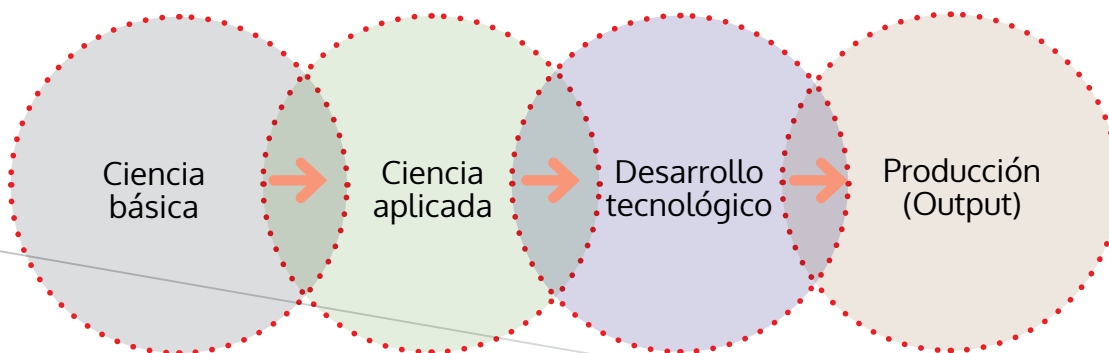
Las empresas son las que tienden a desarrollar y usar la tecnología. A pesar de que los centros de investigación y universidades son esenciales para generar I&D, para que haya una transferencia tecnológica es necesario que las empresas tengan internamente el KH especializado para poner en funcionamiento esta tecnología.

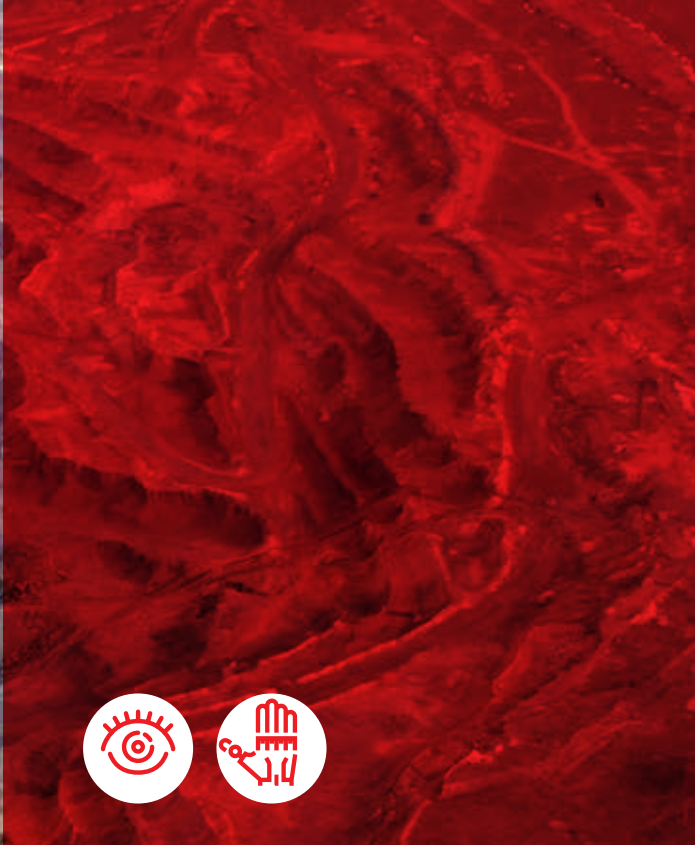
12

### Una nueva forma de generar innovación: modelo dual

El modelo lineal de innovación corresponde a etapas secuenciales donde la ciencia básica es un prerequisite para la innovación tecnológica. Este modelo ha influenciado a las políticas públicas para que financien la ciencia básica, mientras que las empresas deben invertir en el desarrollo de la ciencia aplicada y desarrollo tecnológico.

<sup>5</sup> La palabra "capability" no tiene un equivalente en español. Capabilidad es capacidad más habilidad pero además implica potencial, *know how*. Ver Meller & Parodi (2016)





Revolución  
Tecnológica 4.0  
y Capital Humano





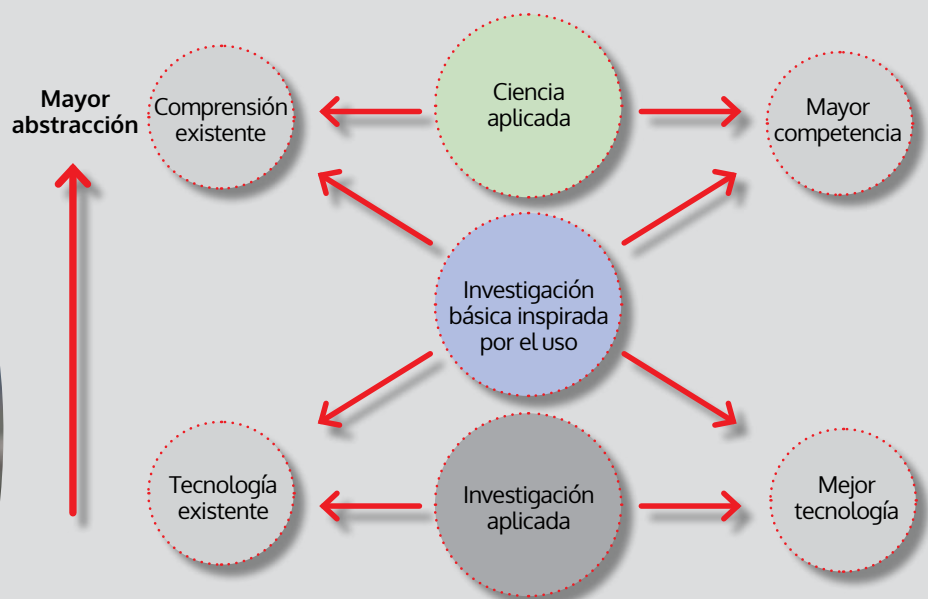
Posteriormente, nace el Modelo Dual (figura 1), donde se vinculan trayectorias interactivas pero semi-autónomas de la comprensión científica y el *know how* tecnológico. Es decir, tanto la ciencia como la tecnología pueden evolucionar por su cuenta independientemente de lo que ocurre con la otra; pero también puede haber influencias recíprocas bidireccionales e interdependientes, inspiradas por la ciencia aplicada.

Con esta nueva concepción del desarrollo tecnológico se propone una combinación de ciencia básica y aplicada que debe ser financiada por el Estado y el sector privado.

A pesar de este cambio de paradigma, el “modelo lineal” de relación entre la ciencia básica y la innovación tecnológica no está muerto. La ciencia sigue siendo fundamental para el desarrollo del conocimiento y debe ser financiada por el Estado para que siga cumpliendo su rol.



**Figura 1: Modelo Dual**



Fuente: Elaboración propia adaptado de Stokes (1997)



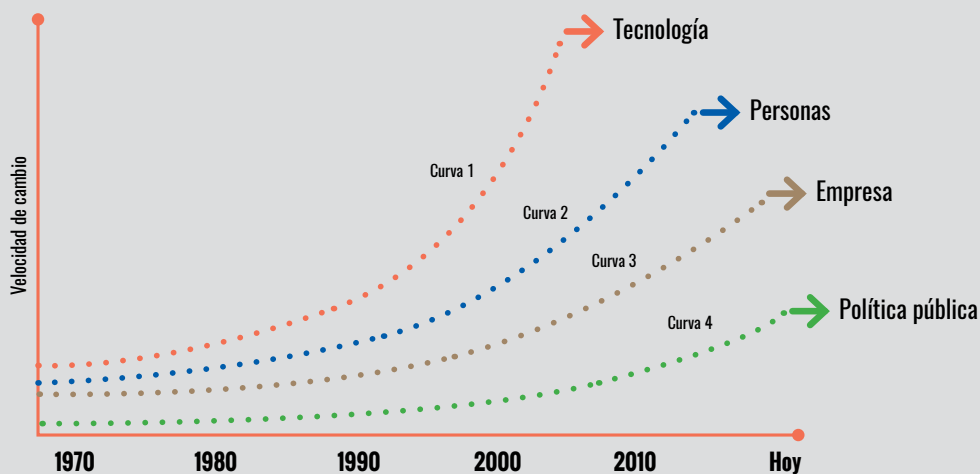
## La tecnología avanza tan rápido que provoca problemas de adaptación

En la figura 2, la curva 1 refleja el cambio exponencial del avance tecnológico. En el comienzo de la década del 2000 la tecnología alcanzó un nivel extraordinario, el cual fue imposible de asimilar por las personas (curva 2), empresas (curva 3) y políticas públicas (curva 4). Es más, se estima que las personas tardaron casi 15 años en disminuir la brecha y hasta el día de hoy esta no se ha eliminado. Las empresas son aún más lentas, con alrededor de 20 años de rezago, ya que la planificación, estructura, puestos de trabajo, definición de metas, etc. fueron previamente establecidos. Finalmente, las políticas públicas, como el salario mínimo, impuestos,

comercio exterior, educación, etc., tienen un rezago estimado de casi 30 años para adaptarse a los avances tecnológicos.

Dada la gran incertidumbre respecto a la tecnología que existirá en el futuro, es importante que los profesionales desarrollen habilidades digitales, de análisis de datos y computación al mismo tiempo que habilidades blandas, como el pensamiento crítico, la creatividad, coordinación y liderazgo de equipos de personas, pensamiento interdisciplinario, flexibilidad, capacidad de adaptación, resolver problemas desconocidos, etc. Hay que fortalecer las competencias personales que los computadores, por esencia, no pueden adquirir (Muro et al. 2017).

**Figura 2: Rezagos provocados por la transición tecnológica**



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Deloitte (2017)

## II. Capital Humano en Chile

Los ingenieros y doctores en ciencias son esenciales para insertarse en la Revolución Industrial 4.0 y así aportar con su conocimiento. Esta nueva etapa que vive nuestra sociedad se caracteriza, entre otras cosas, por la generación de gran cantidad de información, uso de tecnologías digitales y/o automatizadas. Los ingenieros y doctores en ciencias tienen ventajas comparativas para desenvolverse en este entorno.

16

Los ingenieros y doctores en ciencias son esenciales para insertarse en la Revolución Industrial 4.0 y así aportar con su conocimiento.







Veamos a continuación qué sucede con la evolución de nuevos ingenieros y doctores en la última década. Como se aprecia en la tabla 1, entre el año 2007 y el 2017 se sumaron más de 61.000 ingenieros al mercado laboral chileno. Dado que el foco de este estudio es la minería, cabe destacar el notorio incremento de ingenieros de minas. Mientras el total de egresados de ingeniería se duplicó en el periodo, los ingenieros de minas aumentaron en un 1000%. Esto podría estar generando un mercado saturado; pareciera haber un exceso de ingenieros de minas en Chile.

¿A qué se debe esta gran expansión de ingenieros de minas? ¿Es algo generado por la demanda de las compañías mineras? En el año 2007 había cuatro universidades que impartían esta especialidad, con un total de 56 estudiantes titulados. En el 2017 había 12 universidades que la impartían, con 578 estudiantes graduados. La evidencia muestra que los ingenieros de minas son los que tienen los mayores ingresos; esto hace atractivo su estudio. Pero cuando muchas universidades aumentan diez veces la oferta de vacantes, cabe preguntarse cuál es la tasa de desempleo existente.





**Tabla 1:**  
**Titulados de Ingeniería y de Ingeniería de Minas**  
**en Chile (2007-2017)**

| Año                   | Titulados<br>Ingeniería | Titulados<br>Ingeniería de minas |
|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|
| <b>2007</b>           | <b>4.068</b>            | <b>56</b>                        |
| Año                   | Titulados<br>Ingeniería | Titulados<br>Ingeniería de minas |
| <b>2017</b>           | <b>7.704</b>            | <b>578</b>                       |
| Años<br>Total Período | Titulados<br>Ingeniería | Titulados<br>Ingeniería de minas |
| <b>2007<br/>2017</b>  | <b>61.366</b>           | <b>2.684</b>                     |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Educación (2018)

## En Chile hay escasez de doctores en sectores tecnológicos relevantes.

En Chile hay **10.592** doctores (año 2014), de los cuales **2.130** (20%) pertenecen al área de ingeniería y tecnología y **3.236** (30%) a las ciencias naturales.<sup>6</sup>

Existen áreas fundamentales para el desarrollo tecnológico que carecen de doctores especializados. En la tabla 2 se muestra la cantidad de doctores que realizaron su doctorado en cada área. La computación, con solo 36 doctores, es un sector clave para la productividad, crecimiento económico e innovación. Ingeniería ambiental y biotecnología ambiental presentan 50

doctores cada uno; cifra muy baja considerando que el cambio climático y la escasez de recursos naturales son problemáticas que impactan a los países y el bienestar de sus ciudadanos. No hay doctores graduados en nanotecnología. Sin embargo, pueden haber de otras especialidades que podrían estar trabajando en esta área.

Algunos países desarrollados, como Estados Unidos, Canadá y Australia, tienen entre 10 y 20 veces el número relativo de doctores que existe en Chile. Por cada millón de habitantes, Chile cuenta con 596 doctores, mientras que Estados Unidos cuenta con 12.633, Australia con 6.046 y Canadá con 5.300 (tabla 3).

<sup>6</sup> Esta cifra difiere respecto a la información entregada por el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (2016), ya que la clasificación de la OCDE considera dentro de las ciencias naturales algunas áreas que en Chile son impartidas por las facultades de ingeniería. Para efectos de este estudio, las cambiamos de clasificación.







**Tabla 2: Doctores según área de estudio de su doctorado (2011 y 2014)**

| Sub-área OCDE                             | 2011 | 2014 |
|-------------------------------------------|------|------|
| Ingeniería médica                         | 14   | 29   |
| Ingeniería ambiental                      | 56   | 50   |
| Biotecnología ambiental                   | 21   | 50   |
| Nanotecnología                            | 3    | 0    |
| Computación y ciencias de la información* | 14   | 36   |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2016) y Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2015).

\*Esta disciplina está clasificada en el área de ciencias naturales por la OCDE, pero para este estudio la agregamos a ingeniería y tecnología, ya que en Chile suele estar dentro de las facultades de ingeniería.

**Tabla 3: N° de doctores en Australia, Canadá, Chile y Estados Unidos**

| País                  | Doctores (total) | Doctores por millón de habitantes |
|-----------------------|------------------|-----------------------------------|
| Chile (2014)          | 10.592           | 596                               |
| Canadá (2011)         | 208.480          | 6.046                             |
| Australia (2011)      | 118.396          | 5.300                             |
| Estados Unidos (2017) | 4.096.000        | 12.633                            |

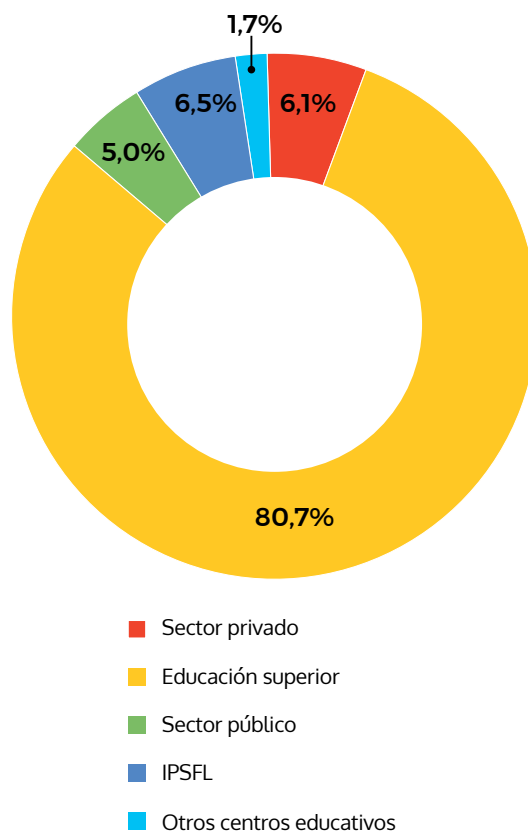
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Statistics Canada (2011); U.S. Census Bureau 2017; Ministerio de Economía (2016); Group of Eight (2013).

En Chile las empresas productivas casi no contratan doctores. Un 81% trabaja en las universidades, mientras que solo un 6% en el sector privado (gráfico 1).

Algunos países desarrollados, como Estados Unidos, Canadá y Australia, tienen entre 10 y 20 veces el número relativo de doctores que existe en Chile.



**Gráfico 1: Doctores empleados por sector (2014)**



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Economía (2016).



### En Chile la I&D no es valorada

Chile invirtió \$613.476 millones el año 2016 en I&D, lo que representa solo un 0,37% del PIB. En comparación con los países de la OCDE, Chile ocupa el último lugar del ranking (OCDE 2016).

En Chile el Estado es el que más invierte en I&D, con un 46,5% del total, mientras que las empresas solo aportan el 36%. Además, existe un escaso financiamiento de empresas a universidades (solo 3,4%) a pesar de que muchas veces son las que se ven más beneficiadas con el desarrollo de innovación y nuevas tecnologías<sup>7</sup>.

<sup>7</sup>Santelices & Lund (2013)

En Chile, el personal dedicado a I&D se concentra en la educación superior (tabla 4). Es preocupante que en Chile la investigación esté mayormente liderada por las universidades, cuyos intereses pueden diferir de los de la industria privada. Es más, solo el 6,5% de los doctores dedicados a I&D trabajan en empresas lo que, sin duda, afecta el desarrollo de innovación tecnológica. A este respecto, conviene señalar que el mecanismo lógico de generación de innovación es que las universidades hagan I&D y que la innovación, la transferencia y el escalamiento se lleve a cabo en empresas. Las universidades solo pueden llegar a prototipos y patentes, los encargados de tomarlos y transformarlos en productos y sistemas son las empresas<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Este planteamiento ha sido sugerido por Javier Ruiz del Solar, Director Ejecutivo de Beuchef Minería.



Solo el 6,5% de los doctores dedicados a I&D trabajan en empresas lo que, sin duda, afecta el desarrollo de innovación tecnológica.

**Tabla 4: Personal dedicado a I&D en empresas y universidades (2016)**  
(Jornadas completas equivalentes)

|                             | % Respecto al total de la categoría |               |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------|
|                             | Empresas                            | Universidades |
| Doctores                    | 6,5%                                | 79,5%         |
| Magíster                    | 19,8%                               | 55,7%         |
| Profesionales y licenciados | 40,8%                               | 49,6%         |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2018).





## El interesante rol de los doctores en países desarrollados

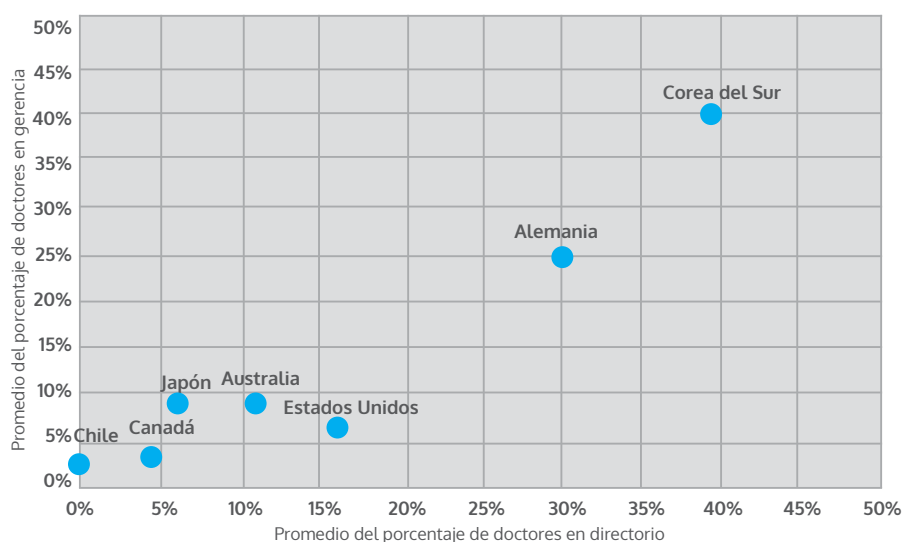
Otra dimensión del rol de los doctores en Chile es la comparación con la cantidad de gerentes y directores con grado de doctor de las empresas líderes de Chile, Alemania, Corea del Sur, Japón, Canadá, EE.UU. y Australia<sup>9</sup>. En el gráfico 2 se aprecia el promedio del porcentaje de doctores dentro de los cargos gerenciales y directivos de cada país. Corea del Sur es el que lidera el ranking, donde cerca de un 40% de los gerentes y los miembros del directorio son doctores. En Alemania, un 30% del directorio y el 25% de los gerentes son doctores, cifras que coinciden con lo que se ha presentado en otros estudios<sup>10</sup>. Chile

está muy lejos, donde un 0% de los directores y solo un 3% de los gerentes son doctores. En síntesis, en países desarrollados hay doctores en cargos gerenciales y también en directorios de empresas; en cambio en Chile solo se registran casos aislados. La falta de doctores en estos cargos puede ser perjudicial para el desarrollo de innovación y tecnología local. Existe evidencia empírica que muestra que las empresas cuyos CEO son doctores tienen un 24% mayor de patentamiento y un nivel de citas un 46% mayor que las empresas cuyos CEO no son doctores (He 2014).

<sup>9</sup> Se agregaron Alemania, Corea del Sur y Japón por ser países líderes en innovación tecnológica.

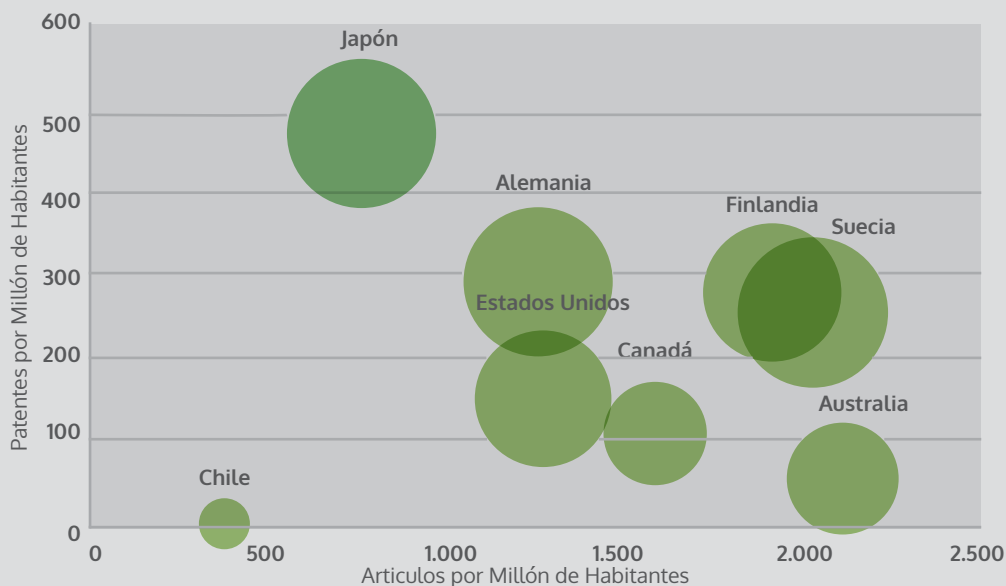
<sup>10</sup> Couston & Pignatell (2018); Cyranoski et al. (2011).

**Gráfico 2: Doctores en las gerencias y directorios de las más grandes empresas mundiales (2018) – 24 de países desarrollados y 6 de Chile**



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de las páginas web de las empresas consideradas, LinkedIn y Bloomberg. Empresas chilenas consideradas: Antofagasta Minerals, Cencosud, Celulosa Arauco, Copec, LATAM y Falabella. Empresas extranjeras consideradas: Amazon, Apple, General Motors, Google, Walmart, Toyota, Allianz SE, Bayer, BMW, Daimler Chrysler, Deutsche Post, Deutsche Telekom, E.ON, SAP, Siemens, Barrick, Brookfield, Power Corporation, Hanwha, Posco, Samsung, BHP, Rio Tinto, Wesfarmers.

**Gráfico 3: Patentes y artículos por millón de habitantes (2013-2017)\***  
**Tamaño de los círculos corresponde al gasto en I&D como porcentaje del PIB**



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de World Bank (2013), OCDE.stat y UN (2017).  
 \*Los datos correspondientes al número de artículos son del año 2013, mientras que los de las patentes del año 2017.



En países desarrollados hay doctores en cargos gerenciales y también en directorios de empresas; en cambio en Chile solo se registran casos aislados.

25

### ¿Qué hacen los doctores en Chile?

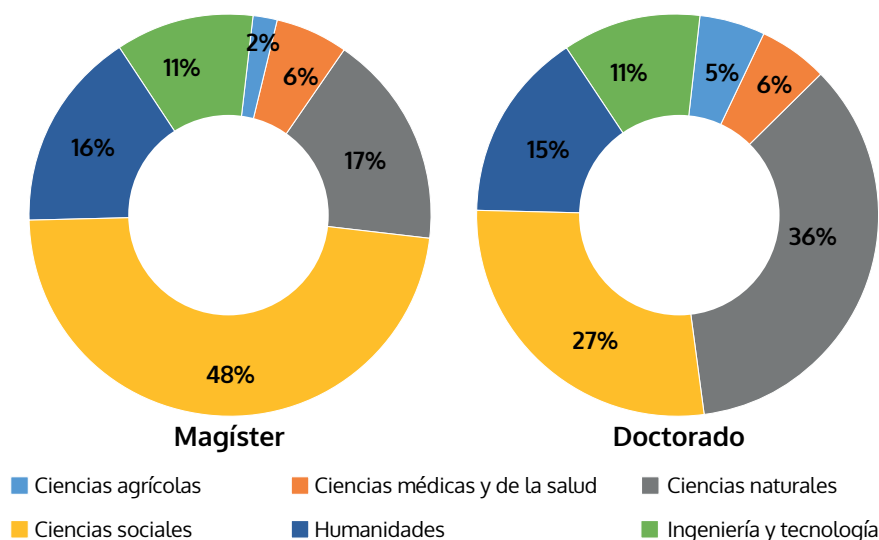
En Chile existe una inclinación a publicar artículos antes que generar patentes. Esto ocurre principalmente por el sistema de promoción universitario y por los incentivos que generan los concursos de financiamiento del Estado para investigación, los que le dan mucha importancia a los artículos (revista WOS ISI).

En el gráfico 3, se presenta la relación entre patentes y publicación de artículos para los diferentes países. El tamaño de la burbuja está de-

terminado por el porcentaje del PIB destinado a I&D. Chile ocupa el último lugar en producción de patentes, con solo cuatro patentes por millón de habitantes, mientras que Japón supera al resto de los países con 470 patentes, seguido por Alemania que alcanza las 292. Estados Unidos, Canadá y Australia producen relativamente menos patentes, pero superan con creces a Chile. Por otro lado, al comparar los artículos, la brecha entre Chile y los otros países no es tan extrema. Por otra parte, existe una relación entre el gasto en I&D y la publicación de artículos y/o inscripción de patentes.

Las ciencias sociales reciben 3 veces más becas de doctorado y 4.5 veces más becas de magíster que las ingenierías. Esta repartición parece inconsistente con las necesidades del país.

**Gráfico 4: Becas de magíster y doctorado por área (2017)**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONICYT (2017).

En síntesis, los esfuerzos de Chile para impulsar I&D son insuficientes. Esto es muy preocupante si queremos seguir siendo competitivos en general y en minería en particular. La industria del cobre podría ser una oportunidad para alcanzar el desarrollo si se aplican los incentivos adecuados y así lograr utilizar la bendición de recursos naturales como una plataforma para la generación de innovación y desarrollo tecnológico<sup>11</sup>.

**La distribución de Becas Chile es inconsistente con las necesidades que tiene el país para insertarse en la Revolución Tecnológica 4.0**

La mayoría de las becas de doctorado otorgadas por Becas Chile están destinadas a las

ciencias naturales (35%), seguido de ciencias sociales (29%) y humanidades (16%). Por su parte, ingeniería y tecnología corresponde solo al 10%, ciencias médicas al 6% y ciencias agrícolas al 5% (gráfico 4). Las ciencias sociales reciben 3 veces más becas de doctorado y 4.5 veces más becas de magíster que las ingenierías. Esta repartición parece inconsistente con las necesidades del país, donde la ingeniería y la minería son sectores clave. La minería representa un 10% del PIB y más de un 50% de las exportaciones, por lo que debería ser prioritario incentivar la formación de KH que desarrolle innovación en este sector.

CONICYT (2017) definió en el año 2017 tres áreas prioritarias para las becas de magíster: recursos

<sup>11</sup> Meller & Gana (2015)



hídricos, resiliencia ante desastres de origen natural y transformación digital.

A pesar de que es un avance, es insuficiente, ya que destinan solo 75 becas a estas áreas y no se consideran disciplinas claves para impulsar el desarrollo de tecnologías acordes a la revolución 4.0, como la robótica, la nanotecnología, etc. Además, tampoco se toman en cuenta áreas relacionadas al medio ambiente, lo cual es preocupante considerando las escaseces de recursos y los riesgos de seguridad en sus suministros, además del cambio climático donde los ingenieros y científicos son fundamentales para generar innovaciones que disminuyan estos impactos<sup>12</sup>.

“No hay una planificación de cuántas personas doctoradas necesita Chile, cuántas estamos generando, y cuántas de las que se necesitan realmente se pueden emplear en investigación” (ANIP 2016). A pesar de que desde el 2009 CONICYT posee un Programa de Atracción e Inserción de Capital Humano Avanzado (PAI), la cobertura de este programa es insuficiente. En un informe del Banco Mundial & la OCDE (2011), se critica especialmente la política de atracción y reinserción de graduados que tiene Chile; que se basa en un método de castigo para el que no regresa en vez de premiar la vuelta al país y apoyarlos en la búsqueda de oportunidades laborales.

<sup>12</sup>Academia de Ingeniería de Chile (2018)



“No hay una planificación de cuántas personas doctoradas necesita Chile, cuántas estamos generando, y cuántas de las que se necesitan realmente se pueden emplear en investigación” (ANIP 2016).





En la minería de Australia y Canadá existe una dotación de investigadores por millón de toneladas métricas de cobre (TMC) hasta 80 veces mayor que la registrada en Chile.

### La minería chilena posee una fuerza laboral poco especializada

Del total del personal dedicado a I&D en Chile, solo 249 se concentran en la industria minera (5%); del total de investigadores<sup>13</sup>, solo 85 trabajan este sector (3%) (tabla 5). En la minería de Australia y Canadá existe una dotación de investigadores por millón de toneladas métricas de cobre (TMC) hasta 80 veces mayor que la registrada en Chile.

Adicionalmente, la cantidad de trabajadores con grados de educación superior es mayor en la industria minera en Australia que en Chile. Además, Australia gasta seis veces más en capacitaciones por trabajador (Consejo de Competencias Mineras 2017; Australian Mining 2013).

<sup>13</sup>Corresponde al personal dedicado a investigación, medido como jornadas completas equivalentes.

**Tabla 5: Investigadores en empresas mineras en Chile y países referentes (2016\*)**

| País      | Personal I&D en minería | Investigadores en minería | Investigadores / millón de TMC |
|-----------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Chile     | 249                     | 85                        | 15                             |
| Australia | 3.668                   | 1.194                     | 1.200                          |
| Canadá    | 1.333                   | 665                       | 950                            |

Fuente: Elaboración propia a partir de OCDE.stat

\*Datos corresponden al año 2016 o último año disponible.

## ¿Por qué las empresas chilenas deberían contratar más doctores?



Los doctores poseen habilidades muy relevantes para las empresas, como la capacidad de resolución de problemas complejos, habilidades para la investigación, capacidad de identificar y definir problemas, estar acostumbrados a trabajar en problemas con incertidumbre en los datos y ser generadores de información y difusores del conocimiento (Durette et al. 2014; Couston & Pignatel 2018; Advisory Council for Science Technology and Innovation 2009).

Para que las empresas se puedan insertar en la Revolución Tecnológica 4.0 es fundamental que sus gerentes y directores comprendan y valoren la importancia de la innovación. Previamente, se señaló que las empresas que contratan gerentes con grado de doctor patentan más, las que alcanzan una mayor cantidad de citas. Esto refleja no solo más innovación, sino además innovación de mayor relevancia. Al mismo tiempo, las empresas que privilegian la innovación tienen incentivos a contratar más doctores.

En general, gran porcentaje de las empresas -incluyendo a las compañías chilenas- no contratan doctores por las siguientes razones (Couston & Pignatel 2018; Benito & Romera 2013; Fixari & Pallez 2005).

1. Las empresas contratan personas que sean capaces de adaptarse rápidamente al quehacer de la empresa y generar ideas y propuestas en el corto plazo.
2. Las empresas creen que no es tan importante innovar, por cuanto es menos costoso y menos riesgoso importar las tecnologías innovadoras.
3. Las universidades están desconectadas de la industria y las empresas no tienen información del contenido docente y foco de la investigación de los doctorados.
4. Desconocen el aporte que pueden traer los doctores a sus organizaciones. No tienen estructuras organizacionales que acojan adecuadamente a estos profesionales<sup>14</sup>.
5. Las empresas prefieren contratar a profesionales con magíster, los cuales se pueden amoldar más fácilmente. Los doctores pueden ser muy críticos y disruptivos.
6. Hay cierta soberbia en el comportamiento de los doctores, quienes menosprecian a personas con grados no-doctor: técnicos, profesionales, magísteres.
7. Los doctores tienden a trabajar de forma individual. Sólo están acostumbrados a interactuar con otros doctores.

<sup>14</sup>Sugerencia de Javier Ruiz del Solar, Director Ejecutivo de Beauchef Minería.





### III. Tendencias Tecnológicas Relevantes para la Minería Futura



Para poder determinar el KH que se necesitará, primero debemos identificar las tecnologías que están adoptando las empresas mineras líderes. Para esto, utilizamos tres enfoques.

### **Enfoque 1:** **Tendencias globales determinantes para el futuro de la minería**

La primera clasificación se basa en el tipo de tecnología, identificando cinco áreas importantes: tecnologías productivas, tecnologías de la información, medio ambiente, seguridad operacional y eficiencia energética. Aquí se describirán brevemente solo algunas.

#### **• Tecnologías productivas**

Este tipo de tecnologías es fundamental para el sector minero. A pesar de que se puede encontrar una gran diversidad de innovaciones en este tipo, las principales son<sup>15</sup>:

**1. Equipos autónomos y remotos:** La automatización es la gestión inteligente de un sistema usando tecnología, de tal manera que su operación pueda ocurrir sin intervención humana. En empresas mineras líderes se está usando esta tecnología en perforación y tronadura, camiones, martillos remotos, trenes, carga de barcos, etc. Estas maquinarias mejoran la productividad, reducen costos, mejoran la seguridad de los trabajadores y reducen la contaminación.

**2. Automatización de sistemas:** El objetivo es lograr, mediante el análisis y uso de grandes volúmenes de información, la constitución de un sistema totalmente interconectado desde la mina al puerto. La empresa pionera en estos avances tecnológicos es Rio Tinto, la cual tiene un centro de operaciones integradas en Perth, Australia, donde se controlan y monitorean las operaciones de la mina. CODELCO también ha implementado este tipo de tecnologías en sus operaciones. En El Teniente existe un Centro Integrado de Operaciones (CIO), que permite monitorear procesos, manejar equipos de forma remota y tomar decisiones integradas<sup>16</sup>. Más recientemente, la División Ministro Hales también ha incorporado un centro integrado de operaciones con excelentes resultados.

**3. Drones:** Se pueden usar para calcular volúmenes, monitorear sondajes, optimizar el manejo del tráfico, diseñar carreteras, etc.

<sup>15</sup> Matysek & Fisher (2016); McKinsey (2017); CSIRO (2017) y Deloitte (2018).

<sup>16</sup> CODELCO (2010).

### • Tecnologías de la Información

Corresponde al uso de sensores, computadores y equipos de telecomunicación para almacenar, recuperar, transmitir y manipular datos o información. "Gran parte de la creación de valor en la minería dejará de basarse en la eficiencia de las operaciones para mover el material y pasará a estar enfocada a qué tan bien las empresas recolectan, analizan y reaccionan a la información en tiempo real para separar y transportar el material de forma más eficiente".<sup>17</sup>

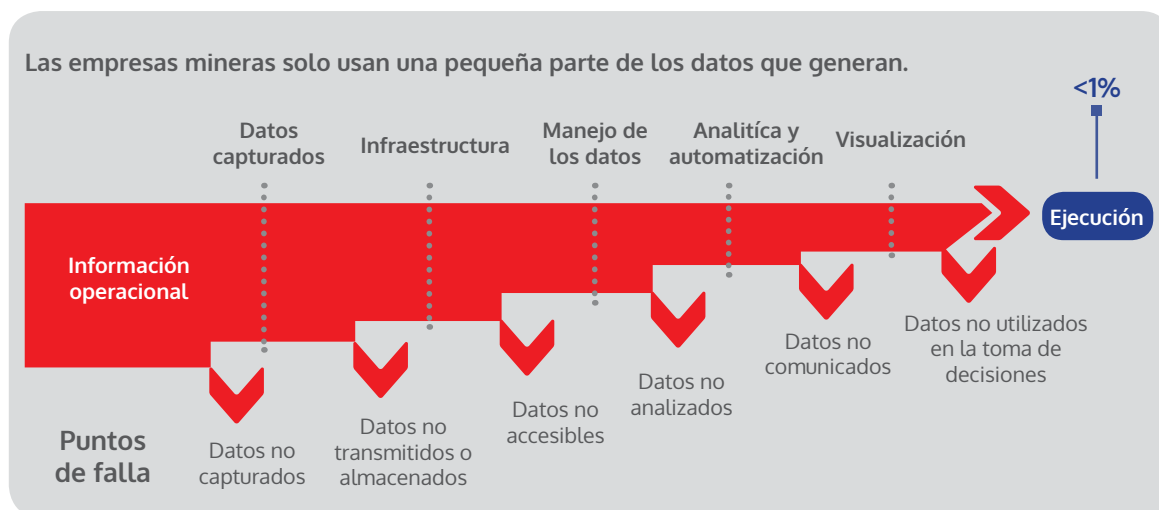
Las empresas mineras producen gran cantidad de datos, sin embargo, menos del 1% de esta información es usada en el proceso productivo para desarrollar predicciones y estrategias, dado que a lo largo del proceso existen diversas fallas que provocan esta ineficiencia (figura 3).

Las empresas mineras producen gran cantidad de datos, sin embargo, menos del 1% de esta información es usada en el proceso productivo para desarrollar predicciones y estrategias.



<sup>17</sup> Durrant-Whyte et al. (2015).

**Figura 3: Datos utilizados por las empresas mineras**



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Durrant-Whyte et al. (2015)





## • Seguridad operacional

A pesar de que el sector minero tiene una de las menores tasas de accidentalidad en Chile, presenta la tasa de mortalidad por accidentes más alta. Además, si comparamos con países relevantes, Chile tiene 21,6 fallecidos por cada 100.000<sup>18</sup> trabajadores protegidos, mientras Estados Unidos tiene 9,8<sup>19</sup> y Australia 2,7<sup>20</sup>.

Por esto, es importante desarrollar innovación en este ámbito. Hay tres tendencias tecnológicas en esta categoría.

**1. Robotización:** Existen robots que pueden reemplazar a los humanos y llevar a cabo tareas peligrosas. Los operadores pueden manejar la maquinaria desde lugares más seguros y limpios a través de imágenes y vídeos en tiempo real.

**2. Sensores de monitoreo:** Pueden detectar y reportar datos de seguridad en tiempo real, como el estado de la maquinaria, la salud y seguridad de los trabajadores, calidad del aire, geolocalización y estabilización de suelos<sup>21</sup>.

**3. Sistemas de ventilación:** Las elevadas temperaturas pueden causar problemas en la salud de los trabajadores. Por ello, hay que diseñar complejos sistemas de ventilación que permitan que la temperatura se mantenga a niveles óptimos.

## • Eficiencia energética

La transición a una matriz energética basada en Energías Renovables No Convencionales (ERNC) ocurrirá de todas formas y mientras antes las empresas sean capaces de adaptarse, más competitivas serán una vez que el cambio

<sup>18</sup> Comisión Nacional de Productividad (2017).

<sup>19</sup> Centers for Disease Control and Prevention (2015).

<sup>20</sup> Safe Work Australia (2018).

<sup>21</sup> Mining Magazine (2018)

ya sea inevitable. Además, un sistema de producción energética basado en ERNC generaría una oferta energética independiente de las fluctuaciones de los precios de los combustibles fósiles.

Las minas autosuficientes en recursos energéticos pueden reducir sus emisiones de carbono hasta un 28% al usar un sistema que combine energía solar, almacenamiento con baterías y generadores diésel, lo cual también es una gran oportunidad para reducir costos y mejorar la calidad del suministro energético<sup>22</sup>.

Chile ha aumentado considerablemente la participación de las ERNC en su matriz energética, ocupando en la actualidad un 20,4% de la capacidad instalada (equivalente a 5.095 MW). Entre la energía solar y eólica alcanzaron el 12% de la matriz energética en el 2018. Cabe destacar el importante incremento de la energía solar, la cual tiene una capacidad instalada de 2.358 MW a



la fecha y que antes del 2012 ni siquiera aparecía dentro de la matriz energética<sup>23</sup>. Por otro lado, ha habido una caída importante de los precios de energía en licitaciones recientes. En el 2017 se llegó a un precio promedio record de 32,5 USD/MWh<sup>24</sup>.

En Chile ya se está trabajando en esto. La CORFO creó el Comité de Desarrollo de la Industria de Energía Solar para impulsar esta industria en el país. Por otro lado, ya existe un proyecto CORFO que busca producir hidrógeno en base a energía solar para alimentar los camiones de la industria minera.

#### • Medio ambiente y comunidad

Los impactos medioambientales que genera la minería son ampliamente conocidos por la población, lo que ha generado un cambio de perspectiva dentro de la industria. La relación con las comunidades ha cambiado, obligando a las empresas a tener una “licencia social para operar”, por lo que tener una comunicación permanente y efectiva con las comunidades ha pasado a ser clave a la hora de desarrollar nuevos proyectos.



<sup>22</sup> Energy and Mines (2017)

<sup>23</sup> CNE (2018)

<sup>24</sup> CNE (2017)

## Enfoque 2: Programas colaborativos

### 1. Programas colaborativos de I&D:

En países desarrollados la tendencia es trabajar colaborativamente entre el sector privado y las universidades<sup>25</sup>, mientras que en América Latina se priorizan las alianzas con clientes, sin considerar a la academia<sup>26</sup>.

La interacción entre el sector privado y las universidades es beneficioso para ambos. A las universidades les permite desarrollar una enseñanza interdisciplinaria y entregar soluciones

tion (RTCMA) en conjunto con la Universidad de Sydney, proyecto que desde 2007 ha entregado resultados satisfactorios.

A pesar de que en Chile algunos centros de I&D trabajan en colaboración con la industria, no hay una alianza sólida y estable en el tiempo. Considerando que la minería trabaja a mediano y largo plazo, es clave tener centros que tengan permanencia en el tiempo y que sean capaces de resolver los desafíos que enfrenta la industria de forma estable y continua. Por ejemplo, el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile, es un centro de inves-



innovadoras a problemas complejos respondiendo a las necesidades de la industria, mientras que a las empresas les permite acceder a conocimiento científico y técnico esencial para enfrentar sus desafíos propios.

Rio Tinto se ha dado cuenta de lo importante que es generar estas alianzas. Por esto, la empresa inauguró el Rio Tinto Centre for Mine Automa-

tización enfocado a desarrollar investigación multidisciplinaria para la minería que más proyectos ha logrado desarrollar con la industria en Chile. Responde directamente a las necesidades del sector y busca soluciones a problemas concretos, por lo que existe una constante interacción entre ambas entidades con el fin de lograr soluciones beneficiosas para ambos. Esto queda de manifiesto en su fuente de financiamiento,

En países desarrollados la tendencia es trabajar colaborativamente entre el sector privado y las universidades.

<sup>25</sup> Borrel-Damian, Morais & Smith (2015)

<sup>26</sup> Agosin et al. (2010)





Ni siquiera en momentos de crisis la industria minera ha sido capaz de colaborar.

la cual ha alcanzado un equilibrio esperado, compuesta por un tercio de fondos provenientes del Programa de Investigación Asociativa (PIA) de Centros Basales de CONICYT, un tercio de fondos concursables para I&D y un tercio que procede directamente de la industria minera (más de \$ 1.500 millones anuales).

36

## 2. Colaboración dentro de la misma industria:

El sector minero es conocido por ser poco colaborativo. En Chile, el sector no ha sido capaz de colaborar ni siquiera en proyectos de beneficio mutuo, como ocurre con las desaladoras, donde podrían aprovechar economías de escala teniendo una gran desaladora compartida por varias empresas en vez de cada una trabajar con la suya propia.

Ni siquiera en momentos de crisis la industria minera ha sido capaz de colaborar. En el año 2015 la minería provocó el mayor desastre ambiental de Brasil cuando el relave Fundão de la empresa Samarco, (controlada por Vale y BHP Billiton) liberó 40 mil millones de litros de agua con sedimentos y sustancias tóxicas, contaminando el suministro de agua, diezmando la fauna local y un alud que provocó la muerte de 19 personas y la pérdida de más de 500 viviendas<sup>27</sup>. Ante esta catástrofe, la

industria no manifestó su interés en crear grupos de trabajo para financiar y desarrollar innovación que prevenga desastres similares en el futuro o planes de acción para actuar de forma rápida en caso de que algo así vuelva a ocurrir. En enero de este año, un relave de la misma empresa, Vale, provocó un desastre ambiental aún peor, obteniendo como resultado la muerte de cientos de personas.

En cambio, en el sector petrolero han reaccionado ante situaciones similares. En EE.UU. la planta Deepwater Horizon de la empresa BP, explotó provocando el derrame de 4,2 millones de barriles de petróleo en el Golfo de México y la muerte de varios operarios. Esta catástrofe impulsó a las grandes empresas del sector a colaborar en la planificación de un protocolo de respuesta en caso de accidentes similares. Chevron, ConocoPhillips, ExxonMobil y Shell inauguraron la iniciativa aportando US\$ 1 billón cada una para formar una organización sin fines de lucro, el Marine Well Containment Company (MWCC), que estaría a cargo de este proyecto. Actualmente, está conformado por 10 empresas; a las cuatro fundadoras se le sumaron Anadarko, Apache, BHP Billiton, BP, Equinor y Hess<sup>28</sup>.

<sup>27</sup> The Guardian (2016)

<sup>28</sup> Marine Well Containment Company (2019)

### Enfoque 3: Tendencias tecnológicas específicas de los procesos productivos

A través del análisis de los procesos productivos, examinaremos los avances de carácter más transversal que están generando un cambio real en cómo se llevan a cabo los procesos. Aquí enfatizaremos la automatización y la digitalización.

Boston Consulting Group aborda este tema. Como se puede ver en la figura 4, el proceso comienza con la exploración y termina con el marketing y comercialización del producto. Las innovaciones más relevantes están asociadas a las tecnologías de información y la automatización. Empresas mineras líderes en innovación han invertido en automatizar sus procesos para reducir costos, mejorar la seguridad de los trabajadores y la eficiencia.

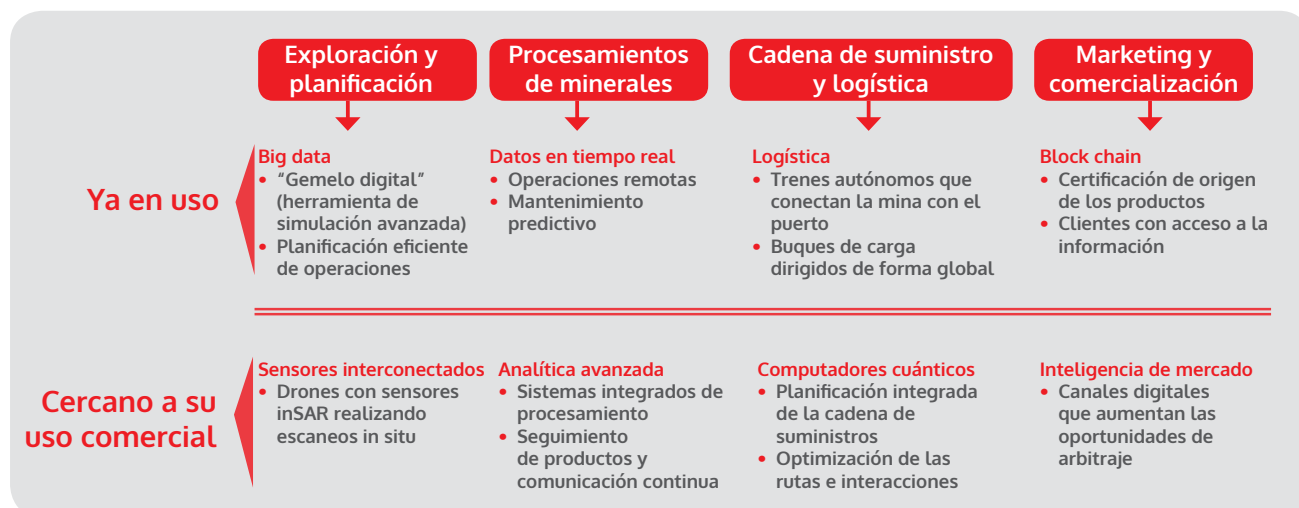
Esta esquematización demuestra que el cambio más revolucionario es el desarrollo del Smart Mining (minería inteligente). A continuación se analiza brevemente cada etapa.

**1. Exploración y planificación:** El uso de *Big Data* disminuirá los costos de exploración. Los avances en computación y otras tecnologías han permitido superar muchos de los desafíos que tenían los profesionales al capturar, clasificar y analizar los datos.

**2. Extracción y procesamiento:** Los robots y la inteligencia artificial pueden llevar a cabo, en forma autónoma o asistida, operaciones asociadas a perforaciones, tronadura, carguío, transporte, rescates, etc. Además, permiten predecir el mantenimiento de las maquinarias y el uso de repuestos, reduciendo las fallas y los costos.



Figura 4: Ejemplos de tecnologías nuevas y emergentes



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Boston Consulting Group (2018)

Es más, los repuestos podrán ser fabricados a través de impresoras 3D y 4D, evitando tiempos de espera y reduciendo costos.

**3. Cadena de suministro y logística:** En América Latina existen problemas estructurales y de productividad en la logística. Esto se debe a una falta de colaboración público-privada y al atraso en la adaptación de tecnologías como el IoT, *cloud computing*, etc. (Manchón 2018). En países desarrollados ya se está priorizando la cadena de suministro y la logística en los procesos productivos. En el año 2017, Rio Tinto inauguró un tren autónomo que conecta la mina con el puerto.

38

**4. Marketing y comercialización:** A pesar de que el consumidor chileno promedio aún no se preocupa de la procedencia de los bienes que compra, en países desarrollados la gente es cada vez más consciente del impacto medioambiental y el respeto a las comunidades. Esto ha impulsado el uso de logos ambientales, que probablemente abarcará también el sector minero.

En la parte inferior de la figura 4 se muestran las tecnologías que aún no están totalmente integradas pero que su adaptación está pronta a ocurrir. Se destaca el uso de sensores interconectados, el análisis avanzado (integración de procesos, seguimiento del producto y comunicación continua), computadores cuánticos (optimización de logística, optimización de rutas) y la inteligencia de mercado.

En síntesis, la evolución de computadores, sensores y técnicas de análisis de datos e inteligencia artificial permitirá fortalecer aún más

la integración de los procesos automatizados dentro de la industria minera<sup>29</sup>. Se estima que en el futuro (largo plazo) la minería estará casi totalmente robotizada y las operaciones serán mayoritariamente remotas<sup>30</sup>. La optimización de los procesos se llevará a cabo en oficinas con expertos mirando paneles de datos y estudiando modelos. Es difícil pronosticar cómo será la minería del futuro, pero lo que sí podemos visualizar es que la digitalización y la automatización serán cada vez más relevantes.

### ¿Qué tipo de capital humano necesitaremos para la minería del futuro?

Expertos aseguran que esta revolución tecnológica requerirá más profesionales en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas<sup>31</sup>. Sin embargo, ¿qué habilidades deberán desarrollar para adaptarse a los cambios tecnológicos? En el caso de los ingenieros, debe evolucionar la forma de enseñanza; la metodología usada mayoritariamente en las universidades chilenas no ha cambiado y se siguen haciendo clases expositivas y evaluaciones escritas en vez de incentivar un aprendizaje más aplicado<sup>32</sup>.

Por otra parte, la OCDE ha estimado que un trabajador promedio chileno tiene un 55% de probabilidades de que sus labores sean automatizadas<sup>33</sup>. Es decir, la fuerza laboral cambiará enormemente y los profesionales tendrán que desarrollar nuevas habilidades. La capacidad

<sup>29</sup> Matysek & Fisher (2016)

<sup>30</sup> Boston Consulting Group (2018)

<sup>31</sup> PricewaterhouseCoopers (PwC) (2015)

<sup>32</sup> Academia de Ingeniería de Chile (2018)

<sup>33</sup> Nedelkoska & Quintini (2018)



Se estima que en el futuro la minería estará casi totalmente robotizada y las operaciones serán mayoritariamente remotas.



de generar modelos estadísticos, algoritmos y poder interpretarlos será esencial. La administración será clave también y las jerarquías se tendrán que simplificar para incentivar una organización más dinámica. En las grandes empresas mineras en Chile existen en promedio dos niveles jerárquicos adicionales que en EE.UU., Australia, Suecia y Canadá<sup>34</sup>.



En el mediano plazo, la forma en que extraemos y procesamos el mineral no va a variar mucho. Lo que realmente cambiará es quién lo hace (robots o personas).

Ahora veamos el caso de la minería. En el mediano plazo, la forma en que extraemos y procesamos el mineral no va a variar mucho. Lo que realmente cambiará es quién lo hace (robots o personas). Se generará mucha información en cada etapa del proceso productivo y se requerirá buena comprensión de lo que esté pasando y tomar decisiones en tiempo real puede significar gran un aumento de eficiencia. Dividiremos el análisis en corto y largo plazo.

<sup>34</sup> Comisión Nacional de Productividad (2017)

- **Corto plazo:**

Los sensores desempeñarán un rol fundamental. Distintos profesionales se necesitarán para desarrollar esta tecnología en cada fase, como identifica Álvaro Egaña, director del laboratorio ALGES del Centro AMTC:

**1. Fabricación del sensor:** Se necesita un profesional; puede ser un ingeniero eléctrico, minero o mecánico. Lo ideal sería tener un sistema multidisciplinario con mallas curriculares compartidas. Si necesitamos crear un sensor con un material que aún no existe se requerirá un doctor; si se desea copiar tecnología de otros países y adaptarla, un ingeniero es suficiente (mientras sea multidisciplinario).

**2. Colocación y operación de los sensores:** Puede ser un técnico, pero en casos más complejos se necesitará un ingeniero. Acá puede surgir una nueva especialidad, algo similar a la función que cumple el tecnólogo médico: un profesional que no necesita ser médico pero debe ser capaz de interpretar un examen. Para los sensores necesitamos un perfil similar. Se podría crear una nueva especialidad en pregrado o un magíster coordinado por dos departamentos.

**3. Captación de datos:** Los que hacen normalmente esta tarea son los ingenieros. Pueden ser electrónicos.

**4. Procesamiento de datos:** El objetivo es convertir los datos en algo que sea interpretable por los analistas. Tienen que saber para qué lo están haciendo, qué es lo que se quiere obtener y qué necesita saber el experto. Por lo tanto, se necesita un especialista, ya sea un profesional con grado de magíster o doctor.

**5. Análisis de datos:** Se necesitan expertos calificados en análisis de datos. Dada la complejidad de este trabajo, se necesita un doctor que sea capaz de modelar y tomar decisiones.

Egaña destaca que los expertos no se podrán reemplazar, dado que no se pueden crear sistemas inteligentes capacitados para tomar decisiones integrales. A medida que estas etapas se vayan complejizando, lo que sí va a cambiar son las habilidades que deberán tener los profesionales, dado que, el proceso va a estar orientado a la toma de decisiones con un nivel de abstracción mucho más alto.



Por tal razón, para enfrentar la Revolución 4.0 es fundamental impulsar el desarrollo de capacidades analíticas. Sin embargo, como país estamos muy lejos de alcanzarlo, falencia que debe ser abordada desde la educación escolar.

Si Chile se viese enfrentado a un cambio repentino de la tecnología usada en minería, los centros de investigación que poseen las universidades podrían ser una buena solución para

Para enfrentar la Revolución 4.0 es fundamental impulsar el desarrollo de capacidades analíticas. Sin embargo, como país estamos muy lejos de alcanzarlo, falencia que debe ser abordada desde la educación escolar.



adaptarse, siempre que tengan profesionales provenientes de diferentes disciplinas, es decir, la interacción interdisciplinaria es fundamental. Las universidades no serán capaces de cambiar sus mallas académicas de forma rápida y espontánea, ya que es una institución muy resistente al cambio, pero pueden crear centros colaborativos que serían una buena solución transitoria.

- **Largo plazo:**

En el largo plazo se complejiza el análisis, ya que el nivel de incertidumbre es muy alto. “Tanto el trabajo, como los mercados y las habilidades requeridas cambiarán, por lo que estamos educando gente para trabajos que aún no existen, usando tecnologías que no han sido creadas para resolver problemas que no hemos podido identificar todavía”<sup>35</sup>. Ante esta incertidumbre, los ingenieros deberán desarrollar habilidades no técnicas, como el autoaprendizaje, el liderazgo, compromiso, retroalimentación y comunicación.

En el sector minero es aún más complejo planificar las adaptaciones a estos cambios, dados los plazos a los que trabaja. Los avances tecnológicos que están a la vanguardia hoy en día quizás estarán obsoletos en cinco años. Entonces, ¿cómo pueden las empresas desarrollar planes flexibles si las decisiones que se toman tienen un horizonte temporal de incluso más de 20 años? Existe claramente una disparidad entre el ciclo de vida de las minas y el de las tecnologías y digitalización que está alterando el funcionamiento del sector<sup>36</sup>.

<sup>35</sup> National Academies of Sciences Engineering and Medicine (2018)

<sup>36</sup> PwC (2017)



Es necesario definir el marco de referencia en el cual se va a posicionar Chile respecto de las futuras innovaciones tecnológicas antes de pensar en el KH especializado que formaremos. Primero, es fundamental definir si vamos a transformarnos en productores de tecnología o si seguiremos importándola. Una vez establecido esto, hay que determinar cómo se va a desarrollar la investigación aplicada en Chile, ya que lo primordial es establecer cuánto vamos a invertir como país en I&D y después ver, según los recursos que dispongamos, cuántos profesionales vamos a necesitar según el presupuesto. Hoy en día se usa el modelo opuesto, se invierte en la formación de doctores sin tener presupuesto para que posteriormente desarrollen investigación (Paul Vallejos y Alejandro Ehrenfeld, investigadores del Centro AMTC).

Simultáneamente y coordinadamente las empresas tienen que integrar en sus organizaciones profesionales altamente calificados y las universidades fortalecer sus centros de I&D aplicada, en los cuales se incentive el desarrollo

**Es fundamental definir si vamos a transformarnos en productores de tecnología o si seguiremos importándola.**

de nuevas tecnologías y se premie el desarrollo de proyectos en conjunto con la industria. La oportunidad de generar esto existe; el problema es que en Chile hay muy poca inversión en I&D y hace falta más investigadores en centros de investigación, pero con recursos y flexibilidad para enfrentar riesgos e incertidumbres inherentes a procesos de innovación.

También es necesario asegurar continuidad en las políticas públicas. La minería es un sector que trabaja a largo plazo, donde las decisiones tecnológicas que se toman hoy tendrán repercusión en 30 años más. El problema es que en Chile cinco años ya es largo plazo y a veces cuando hay cambio de gobierno no se renuevan los proyectos y se pierden los fondos. Rio Tinto invierte en centros de investigación que le entregarán soluciones a 20 años, mientras que en Chile las empresas esperan obtener resultados de un año a otro, lo cual se parece más al trabajo de una consultora que de un centro de investigación.

Los investigadores del AMTC diagnostican que en Chile no existe un ecosistema maduro de innovación. Cuando un investigador genera un prototipo necesita que una empresa proveedora tome esta idea y la transforme en un producto comercializable. En Chile no existen suficientes empresas proveedoras que hagan esto, es decir, no existe un ecosistema tecnológico. En consecuencia, la industria minera no confía en la innovación local. A pesar de que los centros de investigación pueden presentarles soluciones exitosas, nadie les asegura que esto va a tener continuidad en el tiempo, ya que no existe una

empresa que desarrolle ese producto, lo actualice y otorgue el servicio de reparación y mantenimiento.

En síntesis, la incertidumbre respecto a la tecnología que existirá en el futuro hace que los profesionales tengan que ser capaces de pensar de forma multidisciplinaria, conectar ideas y construir información; estas competencias globales

La incertidumbre respecto a la tecnología que existirá en el futuro hace que los profesionales tengan que ser capaces de pensar de forma multidisciplinaria, conectar ideas y construir información.



formarán nuestro mundo y la forma en que vivimos y trabajamos en conjunto (OCDE 2017). Por otro lado, las empresas mineras importan tecnología porque no hay oferta tecnológica local debido a la falta de continuidad en la entrega de los productos y servicios generados localmente. Mientras no se invierta lo necesario para generar las condiciones adecuadas que permitan el

desarrollo de este ecosistema de innovación en Chile, resulta muy difícil determinar qué tipo de profesionales especializados necesitaremos.

Sabemos que “no podemos predecir el futuro, pero creemos que la conversación sobre cómo podría ser el futuro es fundamental.”<sup>37</sup>

<sup>37</sup> PwC (2017)

# Referencias

**Academia de Ingeniería de Chile, 2018.** Visión de Futuro de la Ingeniería y de los Ingenieros en Chile, Santiago.

**Advisory Council for Science Technology and Innovation, 2009.** The Role of PhDs in the Smart Economy.

**Agosin, M. et al., 2010.** La Era de la Productividad: Cómo Transformar las Economías Desde sus Cimientos Banco Interamericano de Desarrollo, ed.

**ANIP, 2016.** Becas Chile, CONICYT y la nula existencia de programas de inserción. Obtenido de: <https://anip.cl/tag/becas-conicyt/>.

**Australian Mining, 2013.** Mining industry spends \$1.15 bn on training: report. Obtenido de: <https://www.australianmining.com.au/news/mining-industry-spends-1-15-bn-on-training-report/>.

**Banco Mundial & OCDE, 2011.** Revisión de Políticas Nacionales de Educación: Programa Becas Chile.

**Benito, M. & Romera, R., 2013.** How to Boost the PhD Labour Market? Facts from the PhD System Side, Madrid.

**Borrel-Damian, L., Morais, R. & Smith, J.H., 2015.** Collaborative Doctoral Education in Europe: Re-

search Partnerships and Employability for Researchers, Brussels.

**Boston Consulting Group, 2018.** The New Technology Frontier in Mining. Obtenido de: <https://www.bcg.com/publications/2018/new-technology-frontier-mining.aspx>.

**Centers for Disease Control and Prevention, 2015.** Statistics: All Mining. Obtenido de: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/statistics/all-mining.html>.

**CNE, 2017.** Valor de la energía más bajo en la historia de las licitaciones en Chile. Obtenido de: <https://www.cne.cl/prensa/prensa-2017/11-noviembre-2017/valor-de-la-energia-mas-bajo-en-la-historia-de-las-licitaciones-en-chile/>.

**CNE, 2018.** Capacidad Instalada de generación [base de datos]. Obtenido de: <https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/>.

**CODELCO, 2010.** Este es el primer paso para la minería del siglo XXI. Obtenido de: [https://www.codelco.com/este-es-el-primer-paso-para-la-mineria-del-siglo-xxi/prontus\\_codelco/2011-05-06/205829.html](https://www.codelco.com/este-es-el-primer-paso-para-la-mineria-del-siglo-xxi/prontus_codelco/2011-05-06/205829.html).

**Comisión Nacional de Productividad, 2017.** Productividad en la Gran Minería del Cobre, Primera Ed., Santiago: Editorial Universitaria S.A.



**CONICYT, 2017.** CONICYT Define Áreas de Interés Prioritario Para Magíster Becas Chile 2018. Obtenido de: <http://www.conicyt.cl/becasconicyt/2017/11/21/conicyt-define-areas-de-interes-prioritario-para-magister-becas-chile-2018/>.

**Consejo de Competencias Mineras, 2017.** Fuerza Laboral de la Gran Minería Chilena 2017-2026: Diagnóstico y Recomendaciones.

**Couston, A. & Pignatelli, I., 2018.** PhDs in business: Nonsense, or opportunity for both? *Global Business and Organizational Excellence*, 37(2), pp.49–58.

**Cyranoski, D. et al., 2011.** The PhD Factory. *Nature*, 472, pp.276–279.

**CSIRO, 2017.** Mining Equipment, Technology and Services: A Roadmap for unlocking future growth opportunities for Australia.

**Deloitte, 2017.** Rewriting the rules for the digital age: 2017 Deloitte Global Human Capital Trends.

**Deloitte, 2018.** Tracking the trends 2018. The top 10 issues shaping mining in the year ahead.

**Durette, B., Fournier, M. & Lafon, M., 2012.** Compétences et employabilité des docteur.

**Durette, B., Fournier, M. & Lafon, M., 2014.** The core competencies of PhDs. *Studies in Higher Education*, 41(8), pp.1355–1370.

**Durrant-Whyte, H. et al., 2015.** How digital innovation can improve mining productivity. McKinsey & Company, (November).

**Energy and Mines, 2017.** Mining Sector Embracing Microgrids: Hybrid Systems Reduce Energy Costs & Environmental Impact. Obtenido de: <http://energyandmines.com/2017/09/mining-sector-embracing-microgrids-hybrid-systems-reduce-energy-costs-environmental-impact/>.

**Etzkowitz, H., 2003.** Innovation in innovation: The Triple Helix of university-industry-government relations. *Social science information*, 42(3), pp.293–337.

**Friedman, T.L., 2005.** The world is flat: A brief history of the twenty-first century, New York: Farrar, Straus and Giroux.

**He, Z., 2014.** Are CEOs With a Ph.D. More Innovative?

**Fixari, D. & Pallez, F., 2005.** Propositions pour favoriser l'emploi des docteurs: Rapport du groupe de travail sur l'emploi des docteurs- FutuRIS Président : Jean-Claude Lehman.

**Manchón, F., 2018.** Los Corredores Logísticos y la Transformación Digital como Catalizadores del Comercio y la Integración Regional. En Conferencia CAF: Productividad e Innovación para el Desarrollo. Bogotá.

**Marine Well Containment Company, 2019.** Membership. Obtenido de: <https://www.marine-wellcontainment.com/about-us/membership/>.

**Matysek, A.L. & Fisher, B.S., 2016.** Productivity and Innovation in the Mining Industry, Canberra.

**McKinsey, 2017.** Beyond the Supercycle: How Technology Is Reshaping Resources.

**Meller, P. & Gana, J., 2015.** El Cobre Chileno Como Plataforma de Innovación Tecnológica 1era Edici., Santiago: CIEPLAN.

**Meller, P. & Parodi, P., 2016.** La Importancia de la Capabilidad Tecnológica en el Mundo Global, CIEPLAN, ed., Santiago de Chile.

**Mining Magazine, 2018.** IoT sensors to improve mine safety. Obtenido de: <http://www.mining-magazine.com/sustainability/news/1332076/iot-sensors-to-improve-mine-safety>.

**Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2016.** Resultados Desagregados CDH. [base de datos]. Obtenido de: <https://www.economia.gob.cl/2016/04/22/segunda-encuesta-trayectoria-de-profesionales-con-grado-de-doc-tor-cdh-ano-de-referencia-2014.htm>

**Muro, M. et al., 2017.** Digitalization and The American Workforce.

**National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2018.** Adaptability of the US Engineering and Technical Workforce: Proceedings of a Workshop, Washington, D.C: The National Academies Press.

**Nedelkoska, L. & Quintini, G., 2018.** Automation, skills use and training, OECD, Paris.

**OECD, 2016.** Gross Domestic Spending on R&D. Obtenido de: <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm>.

**PwC, 2015.** A Smart Move.

**PwC, 2017.** We need to talk about the future of mining.

**Safe Work Australia, 2018.** Fatality statistics by industry. Obtenido de: <https://www.safework-australia.gov.au/statistics-and-research/statistics/fatalities/fatality-statistics-industry>.

**Santelices, B. & Lund, F., 2013.** Innovación con Base Científica: Observaciones para el Análisis y la Formulación de Políticas Públicas. In B. Santelices et al., eds. Innovación Basada en Conocimiento Científico. Santiago: Academia Chilena de Ciencias, pp. 289–301.

**Schwab, K., 2016.** The Fourth Industrial Revolution, World Economic Forum.

**Stokes, D.E., 1997.** Pasteur's quadrant: Basic science and technological innovation., Brookings Institution Press.

**The Guardian, 2016.** Samarco dam collapse: one year on from Brazil's worst environmental disaster.



Beauchef  
MINERÍA





Av. Beauchef N° 850, Santiago, Chile.

Teléfono: +562 29771000

contacto@beauchefmineria.cl

<http://www.beauchefmineria.cl/>

ISBN: 978-956-19-1127-7